第47卷 第12期
2024年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 12
Dec. 2024

盐风化作用下黄土结构的破坏特征与机理

段 钊[1]， 李瑞怡[1]， 宋 昆[1]， 闫旭升[2]， 郑立才[3]， 贺子光[4]

(1. 西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054； 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室，上海 200092； 3. 天津三英精密仪器股份有限公司，天津 300399； 4. 黄淮学院建筑工程学院，河南 驻马店 463000)

摘 要： 探究盐风化作用下(单向脱湿条件)黄土结构的破坏特征和黄土强度的劣化效应，为黄土高原地区的水土保持和灾害防治提供参考依据。选取陕西省府谷县的Q_2黄土，对其开展了不同硫酸钠含量下的宏-微观尺度观测和剪切强度测试。结果表明：(1) 在宏观尺度上，含盐量的增加会显著加剧试样表观的破坏程度和膨胀位移。1.0%~2.5%含盐量试样均表现出轮廓结垢的破坏特征，从不均匀的表面结皮逐渐过渡到大面积的盐斑和膨胀裂纹，但未观察到0.5%较低含盐量的试样表现出盐胀、盐斑和结皮现象。并且整个盐风化过程经历了萌芽期、生长期和平稳期3个阶段。(2) 在微观尺度上，盐风化作用造成黄土中的团聚体和孔隙增多，此外，明显观察到十水合硫酸钠结晶的存在，这是盐风化过程的直接产物。(3) 试样经历盐风化后，剪切特征从应变软化型转变为应变硬化型，并且盐风化作用能显著劣化试样的峰值强度，使内聚力明显降低。随着硫酸钠含量的增加，盐风化作用会加剧黄土发生“结晶膨胀”和“干燥聚沉”，并在其表面和内部形成大量膨胀裂纹和孔隙，最终造成黄土结构和强度的显著破坏。

关 键 词： 黄土；硫酸钠；盐风化；抗剪强度；损伤

文章编号： 1000－6060(2024)12－2041－10(2041～2050)

在黄土自身特点及黄土高原特有的大陆季风气候影响下，盐风化现象普遍存在[1-2]，大量易溶盐通过毛细作用迁移至地表后积聚起来[3-4]，其结晶产生的膨胀会对黄土的结构和强度造成显著破坏[5-6]，进而引发工程病害，加剧地质灾害的形成[7-9]。

当易溶盐在黄土中结晶时，孔壁之间的纳米级液膜控制着结晶压的产生及应力的释放[10]，结晶压最大可达12.57 MPa[11]，这远远高于黄土的抗拉强度[12]。易溶盐通常会分阶段在地表或近地表表现出不同的结晶行为，一般从最初的粒状结晶逐渐分化成须状的结晶[13]。并且，当盐溶液浓度增大时，这种盐风化作用会从“表面结皮”逐渐过渡到“深层开裂”[14]。这些差异性的盐风化作用会对黄土的结构和强度造成不同程度的损伤[15-16]。硫酸钠盐是易溶盐中被公认对岩土材料风化最严重的一类[17]。硫酸钠在蒸发结晶时(温度介于24.00~32.38 ℃)，会结合10个水分子，形成十水合硫酸钠，体积会膨胀至原来的4.18倍[18-19]，其膨胀产生的结晶压无疑会对黄土结构产生严重破坏。

黄土作为第四系松散沉积物[20]，具有大孔隙、弱胶结、垂直节理发育等特征[21]，这为盐风化的发生提供了重要条件。当环境的湿度、温度和盐溶液的浓度、种类等发生变化时，易溶盐会在黄土中聚集和结晶[22]，造成黄土结构和强度损伤[23-25]。在干湿循环过程中，黄土中的易溶盐反复发生结晶—溶解—重结晶，这种相变过程会显著加剧黄土强度的损伤[26]。另外，在冻融循环作用下，易溶盐会因降温结晶而导致黄土发生盐胀变形，升温时，盐分的

收稿日期： 2024-03-06； **修订日期：** 2024-05-09

基金项目： 国家自然科学基金(42177155,41702298)；河南省科技攻关计划项目(232102321016)；河南省教育厅高校重点科研项目(23A410003)资助

作者简介： 段钊(1985-)，男，教授，博士生导师，主要从事黄土力学行为及滑坡机理等方面的研究. E-mail: duanzhao@xust.edu.cn

通讯作者： 李瑞怡(2000-)，女，硕士研究生，主要从事黄土力学行为等方面的研究. E-mail: lizi0110@stu.xust.edu.cn

溶解又使其发生溶陷变形，这种作用会造成黄土表层的盐分急剧上升，进而促进盐风化过程[27-28]。不仅如此，含盐量对盐风化的影响也是相当显著，含盐量低于0.7%时，易溶盐很难在黄土中发生结晶[29]，当含盐量增加时，干燥和冻结作用才会促进盐结晶的发生，造成黄土中的团聚体间孔隙增大，削弱土颗粒间的胶结程度[30]，最终导致黄土结构和强度的损伤，甚至破坏。

大量证据表明易溶盐对中国黄土高原地区的黄土结构破坏显著[31-32]，是造成该地区水土流失和地质灾害频发的重要影响因素之一[33]。陕西省府谷县黄土斜坡常年受盐风化作用影响，滑坡和崩塌等地质灾害频繁发生，引起广泛关注。为此，本研究以陕西省府谷县Q_2黄土为研究对象，以硫酸钠含量为试验变量，通过宏-微观观察试验和直剪试验，厘清盐风化作用下黄土结构的破坏特征与机理，以期为黄土地区土壤退化研究提供理论借鉴，为黄土地区地质灾害防控提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用的Q_2黄土样品取自陕西省府谷县兴旺庄滑坡两侧斜坡，取样深度距坡体表面6 m处。对采取的黄土分别进行粒径级配和常规性质测试，结果表明黄土为低液限黏土(CL)，由约10.04%的砂粒、85.43%的粉粒和4.53%的黏粒组成。具体结果见表1和图1。

1.2 试验方法

本文于2022年4月11日至5月23日对府谷Q_2重塑黄土开展盐风化观察试验和直剪试验。试验开始前，为了消除府谷Q_2黄土中原有盐分对试验结果的影响，采用水洗法对黄土进行脱盐预处理。将黄土破碎并放入去离子水中浸泡24 h后分离滤液，重复清洗直至测得的滤液电导率小于0.001 $S\cdot m^{-1}$时认为黄土完全脱盐[34]。将脱盐后的黄土烘干，并用橡胶锤捣碎，过2 mm筛，最后常温密封保存。试验所用试剂为无水硫酸钠分析纯，溶剂为蒸馏水。含盐量计算方法为盐与干土质量的比值，含水率为水除以盐加干土的质量。保持试验环境温度26±1 ℃，相对湿度40%±5%。

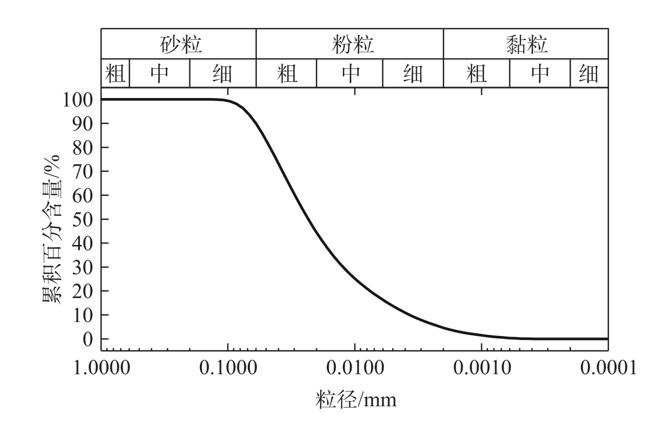


图1 府谷Q_2黄土粒径级配

Fig. 1 Particle size distribution of Q_2 loess in Fugu County

1.2.1 黄土结构观察试验

(1) 宏观观察试验

为削弱水盐迁移对试样结构和强度的影响，设置较低黄土试样目标含水率(10%)，含盐量为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%。根据目标值反算6组浓度的硫酸钠水溶液，将黄土烘干后，将其分别与6组硫酸钠水溶液混合后密封静置48 h。采用分层静压法制备6组直径70 mm、高140 mm的重塑试样，控制试样孔隙比为0.75。试样制备好后快速对其喷涂散斑，之后将试样静置于天平上进行自然脱水，直至含水率降至7.8%后停止观察试验。使用相机连续拍摄整个试验过程，记录各时刻下试样宏观结构特征随含水率的变化。

(2) 微观结构测试

宏观观察试验结束后，在含盐量为0、0.5%、1.5%、2.5%试样内部中心区域削取一小块样品，经真空冷冻干燥24 h后，将调配好的环氧树脂溶液缓慢滴入样品表面，吸管提供负压，使环氧树脂溶液均匀渗透到土体内，待土样完全凝固后推出。使用砂纸和金刚砂溶液对样品进行粗磨，之后使用抛光机在抛光布上喷洒抛光液对样品进行细磨，直至打磨成厚度大约1 mm的薄片。对样品表面镀铂处理

表1 府谷原状Q_2黄土基本性质

Tab. 1 Properties of undisturbed Q_2 loess in Fugu County

密度/$g\cdot cm^{-3}$	含水率/%	孔隙比	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	渗透系数/$10^{-4}cm\cdot s^{-1}$
1.70	12.61	0.75	2.70	29.25	15.80	13.40	3.23

后，最终得到SEM样品[35]。使用场发射扫描电子显微镜（JSM-7610F，日本电子株式会社）对样品微观特征进行观测，分辨率1.3 nm，选取250倍和1000倍下的微观结构影像与不含盐的试样进行对比分析。

1.2.2 黄土强度直剪试验 宏观观察试验结束后，使用环刀（Φ 61.8×20 mm）在试样正中部进行取样，从上至下分别削制3个试样，另外压制一个0含盐量、10%含水率的环刀试样用于对比。使用直剪仪（ZLB-1型，南京土壤仪器厂有限公司）开展不固结不排水剪切试验。设置法向压力分别为50 kPa、100 kPa和200 kPa，剪切速率为0.8 mm·min^{-1}。

2 结果与分析

2.1 宏观破坏特征

从图2中可以看出，随着含盐量的增加，盐风化作用下黄土的破坏程度逐渐加重。当含水率降低到9.5%时，1.5%~2.5%含盐量试样局部出现轻微膨胀，2.5%含盐量试样出现纵向裂纹；当含水率降低到8.5%时，1.0%~2.5%含盐量试样均出现显著的盐斑和膨胀以及轻微粉化现象，1.0%含盐量试样表面开始出现结皮，1.5%含盐量试样表面出现大面积的细小裂纹，2.0%含盐量试样出现锯齿状的膨胀裂纹，2.5%含盐量试样表层的裂纹逐渐开放；当含水率降低至7.8%时，0.5%含盐量试样仍未见明显的盐斑和膨胀，其余含盐量试样的变形破坏程度进一步加剧，裂纹逐渐向试样内部发展。

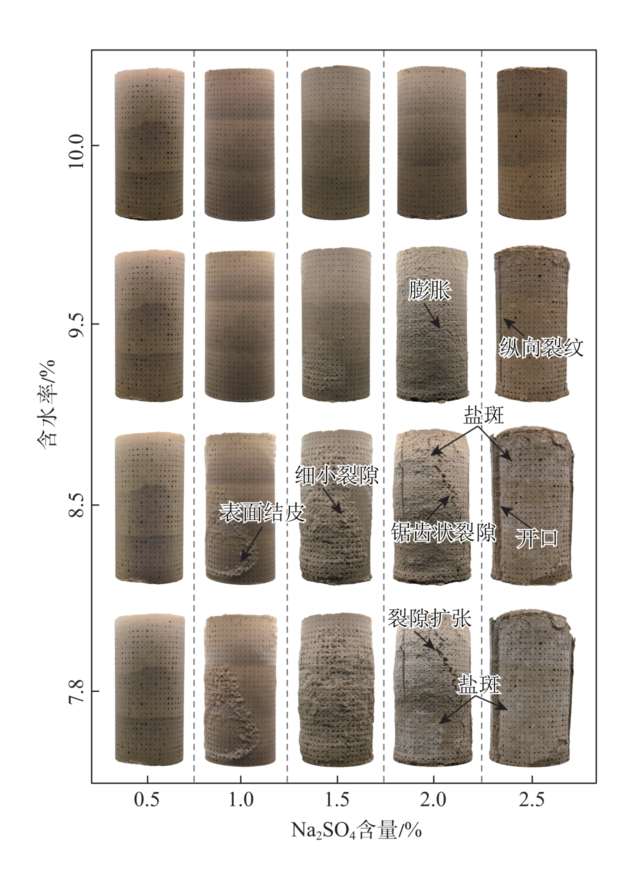


图2 盐风化过程中不同含盐量试样表面的形态差异

Fig. 2 Morphological differences on the surfaces of samples with different salt content during salt weathering

盐风化作用下，试样呈现出明显的膨胀特性，试样向两侧膨胀的最大距离定义为膨胀位移。对获取的散斑图像数据进行二值化和归一化处理，以试样的轴心为原点，试样膨胀位移实际为散斑最大水平位移的2倍。随着含水率的降低膨胀位移表现出阶段性特征（图3），大致可分为萌芽期（含水量从10.0%~9.5%）、生长期（9.5%~8.5%）和平稳期（8.5%~7.8%）3个阶段。萌芽期和平稳期的膨胀位移较小，生长期的膨胀位移较大，1.0%、1.5%、2.0%和2.5%含盐量试样所对应的膨胀位移分别为6.0 mm、9.8 mm、14.6 mm和22 mm。

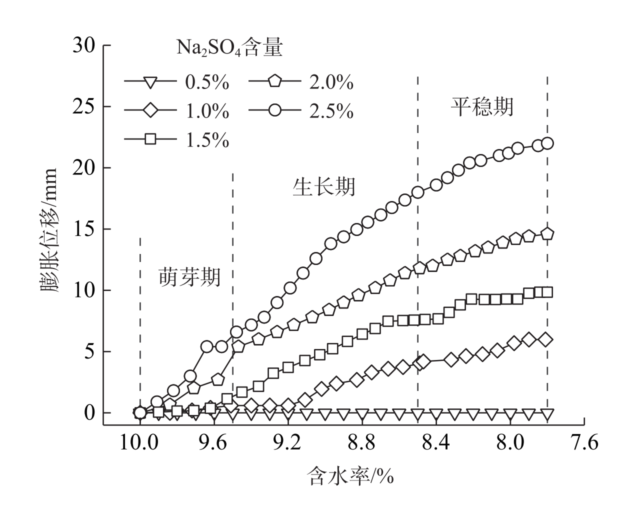


图3 盐风化过程中不同含盐量试样的膨胀位移与含水率的关系

Fig. 3 Relationship between the expansion displacement of samples with different salt content and water content during salt weathering

2.2 微观结构特征

为揭示盐风化作用对土体微观结构的影响，选取含盐量为0、0.5%、1.5%和2.5%盐风化作用后试样的中心区域进行微观结构观察。从图4可以看出，随含盐量增加，土颗粒之间的接触方式和孔隙结构都发生显著变化。0含盐量时，土颗粒之间多为边边接触，且多为接触胶结，孔隙较小（图4a）；

0.5%含盐量时，明显可见孔隙变大，颗粒间距增加（图4b）；1.5%含盐量时，孔隙体积进一步变大，黏粒出现聚集，充填在粉粒和砂粒周围（图4c）；在2.5%含盐量时，开始出现膨胀孔隙，其数量增多且体积变大，同时孔隙内部分布着大量的十水合硫酸钠结晶，颗粒接触大都表现为点点接触（图4d~e）。

2.3 力学强度特征

图5为盐风化作用后试样在50 kPa、100 kPa、200 kPa法向压力下的直剪结果。从图中可以看出，随着法向压力和含盐量的增加，应力-应变曲线从应变软化型逐渐过渡到应变硬化型。0含盐量的试样在各级法向压力下都具有最高的峰值强度，且到达峰值强度时所需的剪切位移最小，具有显著的应变软化现象。随着硫酸钠含量的增加，峰值强度逐渐降低，且试样到达峰值强度对应的剪切位移量变大，应变软化现象逐渐减弱，但硫酸钠含量的增加并未对其残余强度造成大的影响。

试样抗剪强度见图6a，可以明显看出盐风化作用显著降低了试样的抗剪强度，含盐量越高，强度降低越显著。以100 kPa的法向压力为例，不含盐试样在10%（未脱水）和7.8%（脱水后）含水率下的抗剪强度分别为87.03 kPa和103.74 kPa，含盐量为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%试样的（脱水至7.8%含水率）的抗剪强度分别为92.00 kPa、88.15 kPa、82.87 kPa、75.9 kPa、74.53 kPa。从图6b可以看出，随着硫酸钠含量的增加，试样的粘聚力和内摩擦角均呈现下降

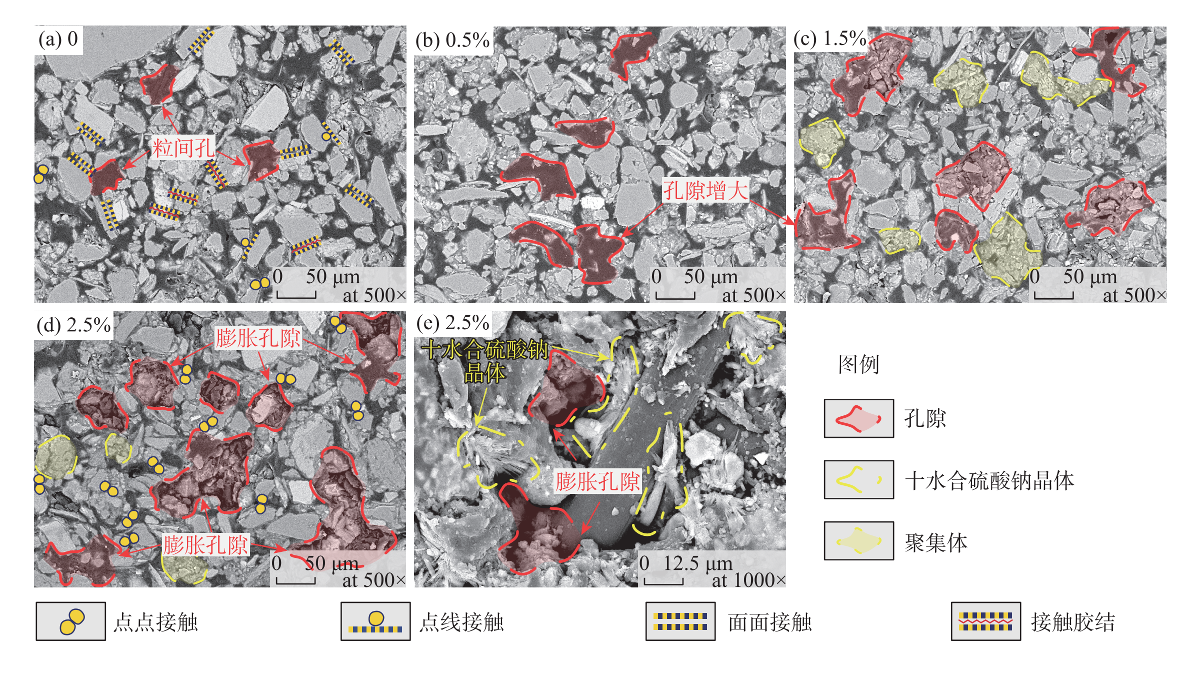


图4 盐风化后不同含盐量试样的扫描电镜图像

Fig. 4 Scanning electron microscope (SEM) images of samples with different salt content after salt weathering

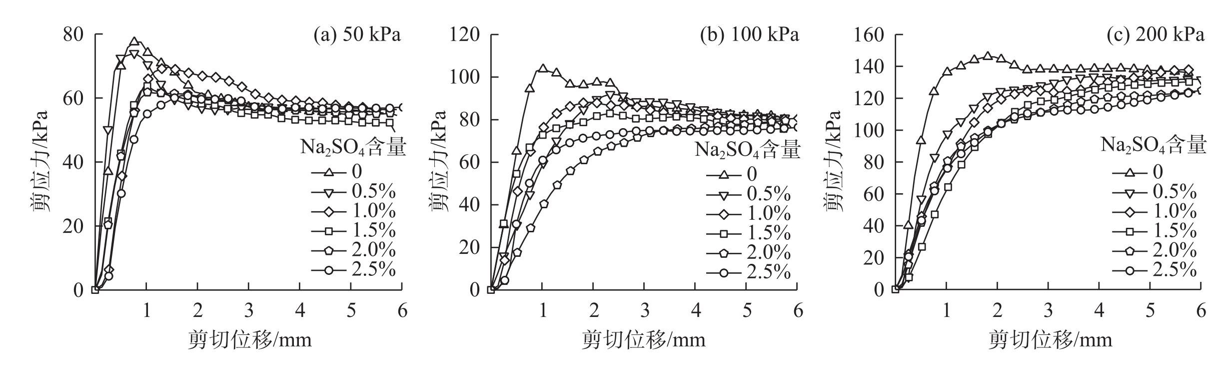
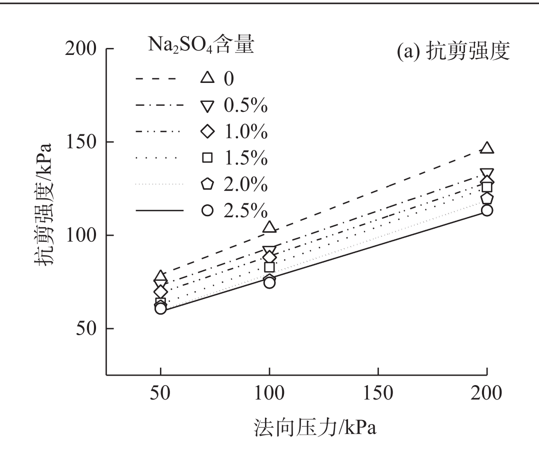


图5 盐风化后试样剪应力-剪切位移关系

Fig. 5 Shear stress-shear displacement relationship of samples after salt weathering



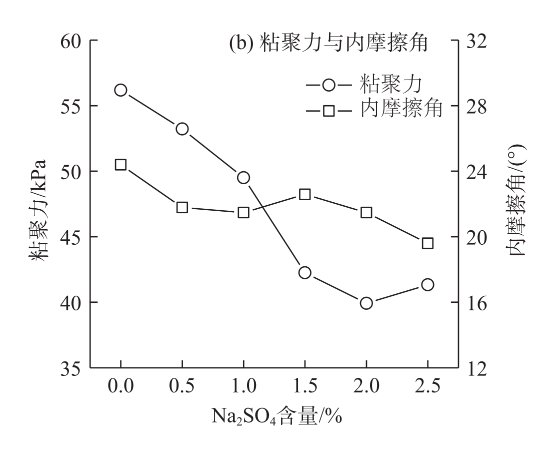


图6　盐风化后试样的强度特征

Fig. 6　Strength characteristics of samples after salt weathering

趋势。0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%含盐量试样对应的粘聚力分别为56.18 kPa、53.22 kPa、49.51 kPa、42.26 kPa、39.92 kPa和41.33 kPa，2.5%含盐量试样相较于0含盐量粘聚力下降约26.4%，内摩擦角分别为24.39°、21.79°、21.47°、22.58°、21.47°和19.59°，内摩擦角下降约19.7%。另外，不含盐试样在10%含水率(未脱水)下的粘聚力和内摩擦角分别为43.62 kPa和24.09°。

3　讨 论

3.1　黄土的盐风化作用阶段与特征

通常易溶盐对岩土体的风化作用包括轮廓结皮和粉化解体2种形式[36]。在本文中，随着含盐量的增加，1.0%~2.5%试样仅在表面和近表面出现不同程度的结皮和轻微的粉化，表现为轮廓结垢特征；0.5%试样受盐风化作用最弱，并没有出现结皮和粉化现象。

盐风化在试样蒸发脱水过程中经历了萌芽期、生长期和平稳期3个阶段[37]。在整个过程中，硫酸钠溶液以毛细水的形式赋存于土体中，并通过蒸发作用逐渐转化成气态水游离到空气中，致使溶液浓度逐渐变大，最终通过结晶形成十水合硫酸钠，造成试样结构破坏。具体过程如下所述：

萌芽期(含水率：10.0%~9.5%)时，试样表面因受蒸发作用影响强烈，最先达到过饱和状态，使得在此最先出现十水合硫酸钠结晶，并在试样表层开始结皮；生长期(含水率：9.5%~8.5%)时，气-液界面开始向土体内部迁移，晶体会随着溶液的毛细作用向外逐层生长，当土颗粒之间没有足够的弯液面力促使溶液提供给晶体发育时，毛细作用会减弱，晶体停止生长，由于此阶段十水合硫酸钠的结晶作用强烈，导致试样膨胀位移最大，在其表面形成一系列的膨胀裂纹(图2)；平稳期(含水率：8.5%~7.8%)时，此阶段为结晶生长后期，毛细作用将更深层土中剩余的溶液带出并缓慢蒸发，此阶段十水合硫酸钠产生的结晶膨胀致使试样表面的裂纹进一步扩张。

3.2　盐风化作用下黄土强度的劣化效应

盐风化作用下含盐量的增加会显著降低试样的峰值强度，但对残余强度的劣化不大，这是由于盐晶体的产生主要破坏了土颗粒间的胶结作用，另外，盐晶体的强度要远低于黄土中的矿物，这导致试样在被剪切破坏后，残余强度的下降幅度没有峰值强度那么显著。实际上，在盐风化过程中，不含盐试样的抗剪强度会随着含水率的降低而逐渐恢复，然而，对于含盐试样来说，盐风化对其强度造成的损伤要明显大于不含盐试样脱水干燥恢复的那一部分，并且这种效果会随着含盐量的增加逐渐加强，最终导致试样强度完全丧失。

除了盐晶体破坏土颗粒之间的胶结作用，在试样中产生大量的膨胀孔隙外(图4e)，试样在经历盐风化时，其内部土颗粒会发生“干燥聚沉”(图4c~d)，促使孔隙进一步增大，这直接导致试样的粘聚力最大下降了16 kPa。而对于内摩擦角来说，黄土的含水率和土颗粒的形态对其起重要作用[38]，有研究表明，硫酸钠并不会对土颗粒形态造成太大影响[39]，且本文中试样的含水率较低(10%)，使得土颗粒在剪切过程中缺少水的润滑[40]，这些因素的综合作用导致盐风化作用下试样的内摩擦角下降不明显。

3.3 盐风化作用下黄土结构的破坏机理

在本次试验中，“结晶膨胀”和“干燥聚沉”的双重作用是造成黄土结构损伤的主要原因。

一方面，黄土在蒸发过程中，盐分和孔壁之间存在的纳米级液膜控制着结晶压的产生和应力的释放，液膜之间的分离压力上限被称为结晶压力[10]。结晶压力一旦产生，盐晶体将冲破液膜，并与孔壁接触，但随着冲破距离的变大，液膜逐渐被消耗，晶体的生长也将会随之停止[17]。通常，盐的结晶压力远远高于黄土的抗拉强度[12]，尤其十水合硫酸钠的结晶压力很高[11]，其结晶压力的产生会直接削弱土颗粒之间的胶结程度，促使土颗粒间距增大，造成胶结损伤和胶结破坏，同时在黄土内部形成膨胀孔隙。因此，结合本次试验中黄土在蒸发条件下的宏-微观特征，认为结晶压力导致的膨胀是造成黄土结构破坏的一个重要原因。

另一方面，黏粒一般表现负电性，黄土在蒸发脱水时，孔隙溶液中钠离子浓度的升高，会对扩散层中的反号离子起排斥作用并使其被迫进入固定层，同时扩散层中的部分水分子会逃逸到本体水中，促使扩散层变薄[41-42]，黄土的基质吸力增大[43]，一些较细的粉粒和黏粒逐渐相互吸引，产生聚团，最终发生“干燥聚沉”，造成黄土强度下降，这与在扫描电镜测试中观察到的现象一致(图4c~d)。

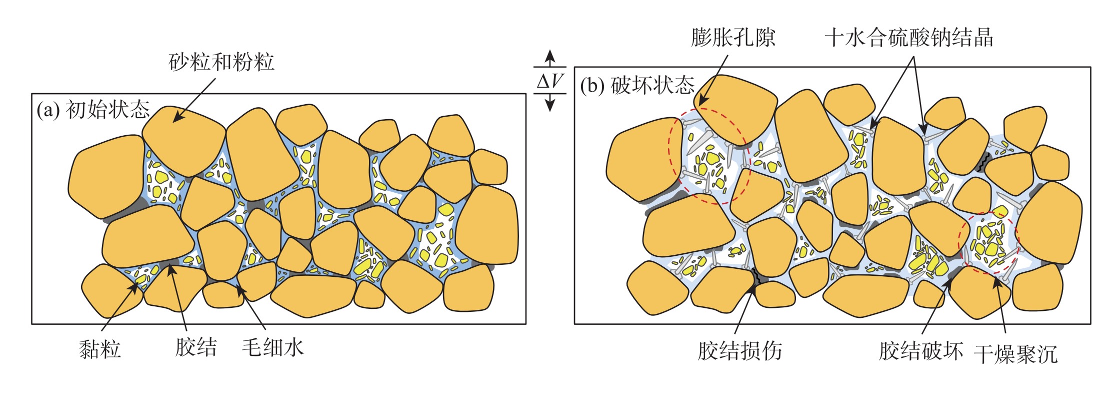
此外，盐溶液的粘度对黄土结构的影响同样十分突出，粘度的增加会显著影响盐溶液在黄土中的流动和蒸发动态，促进“结晶膨胀”和“干燥聚沉”的发生。通常，黄土中盐溶液的粘度与含盐量成正比。在本文试验中，含盐量较小试样中溶液的毛细流动速度较高，当处在蒸发环境中时，黄土内部溶液向外迁移的毛细流动速度要比盐分蒸发结晶的速度快，盐溶液不断向黄土表层迁移后并发生结晶，这时“蒸发锋”位于黄土表层附近；相反的，含盐量较高试样内部盐溶液的毛细管流动速度较慢，结晶发生的速度要比黄土内部盐溶液向外迁移的毛细流动速度快，这时“蒸发锋”逐渐深入黄土内部，结晶压力造成黄土深层开裂，导致黄土内部结晶和孔隙逐渐发育[15-16]。

总之，“结晶膨胀”和“干燥聚沉”的双重作用会促使黄土中孔隙的体积膨胀和数量增多，并且含盐量的增加会加剧这2种作用，进而对黄土的结构和强度造成损伤，甚至破坏。盐风化作用下黄土结构破坏的损伤机理见图7。

3.4 与冻融的比较

由于气候变化和土地利用，盐风化在黄土地区普遍存在，土体中的硫酸钠在长期的水盐迁移作用下在斜坡坡面(非饱和带)聚集，受蒸发影响，盐溶液失水达到饱和状态，十水合硫酸钠结晶析出，体积膨胀至原来的4.18倍，如持续失水，十水合硫酸钠晶体将会转变为无水硫酸钠，体积缩小[18]。在上述过程中，硫酸钠破坏了土颗粒间的胶结作用，并在试样中产生大量膨胀孔隙。加上“干燥聚沉”作用，一些较细的粉粒和黏粒相互吸引，产生聚团，土体内部孔隙进一步扩张，使得表层黄土结构严重劣化。这一作用在温度湿度变化反复的夏秋季节作用强烈。

相比之下，冻融对斜坡黄土的破坏位置主要在斜坡坡脚饱水带，在短时间内(循环次数少)也会因冻胀引起土体体积膨胀，但冻结所造成的土体结构损伤远不如盐风化强烈。土体因低温冻结时，固态



注：ΔV为体积膨胀。

图7 盐风化作用下黄土结构的破坏机理

Fig. 7 Characteristics of structural damage in soil under salt weathering

冰将土颗粒牢牢的胶结在一起，其力学性质反而得到加强，而土体结构和强度的劣化，更多是在升温时，土体在自重及外荷载共同作用下因溶沉引起的土体结构重塑[44-46]。这一作用主要发生在冬春季节。可见，盐风化和冻融作用，在黄土斜坡的作用位置、短期内作用强度、作用发生的季节都有显著差异。

4 结论

本文以陕西省府谷县Q_2黄土为研究对象，在宏-微观尺度下对Q_2黄土结构的破坏特征进行观察和分析，开展了一系列抗剪强度测试，揭示了盐风化作用下黄土结构的破坏特征与机理，主要得出以下结论：

（1）盐风化过程中，试样表面和内部结构由于盐的结晶膨胀遭到破坏，产生膨胀裂缝和膨胀孔隙，其中1.0%~2.5%含盐量试样的破坏特征表现为轮廓结皮和轻微粉化，0.5%含盐量试样没有出现破坏特征。

（2）试样的膨胀位移随含水率降低表现出3个阶段：萌芽期、生长期和平稳期，且生长期膨胀位移最大。

（3）盐风化作用会导致试样出现应变硬化现象，显著劣化试样抗剪强度和粘聚力。

（4）盐风化作用下，试样会发生盐分的“结晶膨胀”和黏粒的“干燥聚沉”，并且含盐量的增加会显著加剧试样结构和强度的破坏程度。

本文旨在揭示持续蒸发状态下单一硫酸钠盐结晶引起的黄土损伤特性。然而，自然环境中，土体中包含了各种由大气、雨水、地下水及化学废料污染产生的易溶盐和其他化学物质，这对土体产生的影响是深远且复杂的，涉及到农业生产、土遗址保护及岩土工程等诸多领域，这也成为了相关学者重点研究的科学问题。本研究的成果能为今后硫酸钠盐害问题的研究和防治工作贡献出一些有益的参考。

参考文献（References）

[1] 吕洪波，苏德辰，章雨旭，等．中国不同气候带盐风化作用的地貌特征[J]. 地质论评, 2017, 63(4): 911-926. [Lü Hongbo, Su Dechen, Zhang Yuxu, et al. Landform features of salt weathering in different climatic zones in China[J]. Geological Review, 2017, 63(4): 911-926.]

[2] 任科法，谢振斌，汪灵，等．四川仁寿牛角寨石窟盐风化作用机理与气候响应[J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1368-1386. [Ren Kefa, Xie Zhenbin, Wang Ling, et al. Salt weathering mechanism and climate response in Niujiaozhai Grottoes, Renshou, Sichuan[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1368-1386.]

[3] 周凤玺，冉跃，万旭升，等．盐渍土在蒸发过程中的水盐相变行为研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 1030-1038. [Zhou Fengxi, Ran Yue, Wan Xusheng, et al. Water-salt phase transition of saline soils during evaporation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1030-1038.]

[4] 郭敏，李新虎，王弘超，等．盐结皮厚度对土壤水盐分布特征的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(8): 1303-1313. [Guo Min, Li Xinhu, Wang Hongchao, et al. Effect of salt crust thickness on distribution characteristics of soil water and salt[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(8): 1303-1313.]

[5] 靳治良，陈港泉，夏寅，等．土质文物盐害中硫酸钠的研究——从微观到宏观[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(1): 54-62. [Jin Zhiliang, Chen Gangquan, Xia Yin, et al. Sodium sulfate behind earthen relics salt damages: From micro to macro[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2016, 28(1): 54-62.]

[6] 刘彦辉．碳酸盐渍土的膨胀特性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 119-121. [Liu Yanhui. A study on expansion characteristics of carbonate saline soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 119-121.]

[7] 许健，郑翔，王掌权．黄土边坡盐蚀剥落病害特征调查及其水盐迁移规律研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 741-748. [Xü Jian, Zheng Xiang, Wang Zhangquan. Investigation for water and salt migrations on spalling disease of loess slope caused by salification erosion[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 741-748.]

[8] Duan Z, Cheng W C, Peng J B, et al. Interactions of landslide deposit with terrace sediments: Perspectives from velocity of deposit movement and apparent friction angle[J]. Engineering Geology, 2021, 280(5): 105913, doi: 10.1016/j.enggeo.2020.105913.

[9] Dong C X, Duan Z, Li R. Impact liquefaction mechanism of sandy silt with a change in impact energy[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2023, 56(3): qjegh2022122, doi: 10.1144/qjegh2022-122.

[10] Espinosa Marzal R M, Scherer G W. Crystallization of sodium sulfate salts in limestone[J]. Environmental Geology, 2008, 56(3): 605-621.

[11] Wu S, Wu D, Huang Y. Evaluation of the crystallization pressure of sulfate saline soil solution by direct observation of crystallization behavior[J]. American Chemical Society Omega, 2021, 6(27): 17680-17689.

[12] 李春清，梁庆国，吴旭阳，等．重塑黄土抗拉强度试验研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 233-238, 248. [Li Chunqing, Liang Qingguo, Wu Xuyang, et al. Study on the test of tensile strength of

remolded loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 233-238, 248.]

[13] Zehnder K, Arnold A. Crystal growth in salt efflorescence[J]. Journal of Crystal Growth, 1989, 97(2): 513-521.

[14] 唐洋, 李新虎, 郭敏, 等. 不同初始盐分浓度下土壤盐结皮的形成过程及其对蒸发的影响机理[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1137-1145. [Tang Yang, Li Xinhu, Guo Min, et al. Formation process of soil salt crust and its influence mechanism on evaporation under different initial salt concentrations[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1137-1145.]

[15] Agudo E R, Mees F, Jacobs P, et al. The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates[J]. Environmental Geology, 2007, 52(2): 269-281.

[16] Dai S, Shin H, Santamarina C J. Formation and development of salt crusts on soil surfaces[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(5): 1103-1109.

[17] Espinosa Marzal R M, Scherer G W. Advances in understanding damage by salt crystallization[J]. Accounts of Chemical Research, 2010, 43(6): 897-905.

[18] 靳治良, 刘端端, 张永科, 等. 盐分在文物本体中的迁移及毁损机理[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(5): 102-116. [Jin Zhiliang, Liu Duanduan, Zhang Yongke, et al. Salt migrations and damage mechanism in cultural heritage objects[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2017, 29(5): 102-116.]

[19] 王策, 沐方元, 刘东浩, 等. 硫酸盐渍土盐胀结晶试验研究进展[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(11): 120-124. [Wang Ce, Mu Fangyuan, Liu Donghao, et al. Progress in salt expansion crystallization test of sulphuric acid saline soil[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, 43(11): 120-124.]

[20] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312. [Xu Zhangjian, Lin Zaiguan, Zhang Maosheng. Loess in China and loess landslides[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1297-1312.]

[21] 段钊, 李珍艳, 牛兵, 等. 孔压增速对黄土静态液化特性影响试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 179-186. [Duan Zhao, Li Zhenyan, Niu Bing, et al. Influence of increasing in pore water pressure gradient on static liquefaction characteristics of loess[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6): 179-186.]

[22] 蒙慧敏, 占车生, 胡实, 等. 大型灌区土壤水盐运移模拟研究进展[J/OL]. [2024-08-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20240403.1005.001.html. [Meng Huimin, Zhan Chesheng, Hu Shi, et al. Research progress on simulation of soil water-salt transport in large-scale irrigation districts[J/OL]. [2024-08-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20240403.1005.001.html.]

[23] Masato S, Tsuyoshi H. A laboratory experiment on salt weathering by humidity change: Salt damage induced by deliquescence and hydration[J]. Progress in Earth and Planetary Science, 2018, 5(1): 1-10.

[24] Mokni N, Olivella S, Alonso E. Swelling in clayey soils induced by the presence of salt crystals[J]. Applied Clay Science, 2009, 47(1): 105-112.

[25] 吕擎峰, 谷留杨, 郭连星, 等. 硫酸盐含量对黄土黏粒特性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 12-20. [Lü Qingfeng, Gu Liuyang, Guo Lianxing, et al. Effect of sulfate content on clay characteristics of loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 12-20.]

[26] 许健, 任畅, 高靖寓, 等. 干湿循环效应下 Na_2SO_4 盐渍原状黄土渗透特性与细观机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1644-1654. [Xu Jian, Ren Chang, Gao Jingyu, et al. Influence of dry-wet cycles on hydraulic conductivity and microstructure of saline undisturbed loess with sodium sulfate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology Edition), 2021, 52(5): 1644-1654.]

[27] 黄佑芬, 吴道勇, 吴诗雨. 冻融循环条件下重塑硫酸盐渍土变形试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 602-611. [Huang Youfen, Wu Daoyong, Wu Shiyu. Experimental study on deformation of remolded sulfate saline soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2): 602-611.]

[28] 张殿发, 王世杰. 土地盐碱化过程中的冻融作用机制——以吉林省西部平原为例[J]. 水土保持通报, 2000(6): 14-17. [Zhang Dianfa, Wang Shijie. Mechanism of freeze thaw action in land salinization process: As an sample in west Jilin Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000(6): 14-17.]

[29] Lai Y, Wan X, Zhang M. An experimental study on the influence of cooling rates on salt expansion in sodium sulfate soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 124: 67-76.

[30] Nie Y, Ni W, Tuo W, et al. Collapsibility deterioration mechanism and evaluation of compacted loess with sodium sulfate under drying-wetting cycles[J]. Natural Hazards, 2023, 115(1): 971-991.

[31] 马建全, 邱勇强, 赵晓杰, 等. 盐分及含水率对甘肃黑方台黄土强度的影响研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(4): 819-825, 886. [Ma Jianquan, Qiu Yongqiang, Zhao Xiaojie, et al. Effects of salinity and moisture content on the strength of loess in Heifangtai, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(4): 819-825, 886.]

[32] Fu J, Hu X, Li X, et al. Influences of soil moisture and salt content on loess shear strength in the Xining Basin, northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(5): 1184-1197.

[33] 李志强. 灌溉-蒸发耦合作用下黄土高原盐沼湿地水盐运移规律研究 ——以甘肃省黑方台为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2021. [Li Zhiqiang. Research on the laws of water and salt transport in salt marsh wetland of Loess Plateau under the coupling action of irrigation and evaporatio[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.]

[34] 邴慧, 武俊杰, 邓津. 黄土状盐渍土洗盐前后物理力学性质的变

化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 796-800. [Bing Hui, Wu Junjie, Deng Jin. Variations of physical and mechanical properties of saline loess before and after desalting[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(4): 796-800.]

[35] Duan Z, Li Z Y, Wu Y B, et al. Mechanical and microscopic properties of soil according to the rate of increase in pore water pressure[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105530, doi: 10.1016/J.STILL.2022.105530.

[36] Charola A E. Salts in the deterioration of porous materials: An overview[J]. Journal of the American Institute for Conservation, 2000, 39(3): 327-343.

[37] 唐朝生, 施斌, 顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 875-881. [Tang Chaosheng, Shi Bin, Gu Kai. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 875-881.]

[38] Meng J, Li X A. Effects of carbonate on the structure and properties of loess and the corresponding mechanism: An experimental study of the Malan loess, Xi'an area, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78: 4965-4976.

[39] Hu W, Cheng W C, Wen S, et al. Effects of chemical contamination on microscale structural characteristics of intact loess and resultant macroscale mechanical properties[J]. Catena, 2021, 203: 105361, doi: 10.1016/J.CATENA.2021.105361

[40] Moore R J. The chemical and mineralogical controls upon the residual strength of pure and natural clays[J]. Geotechnique, 1991, 41: 35-47.

[41] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 30-43. [Tang Daxiong. Rock and soil engineering[M]. Beijing: Geology Press, Beijing, 1999: 30-43.]

[42] Kang X, Zou X, Sun H, et al. Molecular dynamics simulations of microstructure and dynamic shearing behaviors of kaolinite-water-salt system[J]. Applied Clay Science, 2022, 218: 106414, doi: 10.1016/J.CLAY.2022.106414.

[43] 唐朝生, 施斌, 刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-673. [Tang Chaosheng, Shi Bin, Liu Chun. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 663-673.]

[44] 李海燕, 王正伟, 刘亚伦. 某高原公路含盐冻土力学强度研究[J]. 路基工程, 2024(2): 95-100. [Li Haiyan, Wang Zhengwei, Liu Yalun. Study on mechanical strength of saline frozen soil on a plateau highway[J]. Subgrade Engineering, 2024(2): 95-100.]

[45] 倪万魁, 师华强. 冻融循环作用对黄土微结构和强度的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(4): 922-927. [Ni Wankui, Shi Huaqiang. Influence of freezing-thawing cycles on micro-structure and shear strength of loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(4): 922-927.]

[46] 叶万军, 李长清, 杨更社, 等. 冻融环境下黄土体结构损伤的尺度效应[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2336-2343, 2360. [Ye Wanjun, Li Changqing, Yang Gengshe, et al. Scale effects of damage to loess structure under freezing and thawing conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2336-2343, 2360.]

Damage characteristics and mechanisms of soil structures under salt weathering

DUAN Zhao[1], LI Ruiyi[1], SONG Kun[1], YAN Xusheng[2], ZHENG Licai[3], HE Ziguang[4]

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Sanying Precision Instruments Co., Ltd, Tianjin 300399, China; 4. College of Architecture and Civil Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, Henan, China)

Abstract: This study investigates the damage characteristics of loess structures and the deterioration of loess strength under the influence of salt weathering, with a focus on unidirectional dehumidification conditions. The findings provide valuable references for soil and water conservation, as well as disaster prevention strategies in the Loess Plateau. Q_2 loess from Fugu County, Shaanxi Province, China was selected for macro- and micro-scale observations and shear strength tests under varying sodium sulfate contents. The results indicate the following: (1) Macroscopic effects: An increase in salt content significantly impacts the apparent damage degree and expansion displacement of the samples. Samples with salt contents ranging from 1.0% to 2.5% exhibited contour scaling damage characteristics, transitioning from uneven surface crusts to extensive salt spots and expansion cracks. In contrast, samples with a lower salt content of 0.5% did not show salt swelling, salt spots, or crust formation. The salt weathering process progresses through three stages: germination, growth, and stability. (2) Microscopic effects: Salt weathering leads to the formation of agglomerates and expansive pores within loess. Sodium sulfate decahydrate crystals were observed as a direct result of the salt weathering process. (3) Shear characteristics: The shear behavior of the samples transitioned from strain softening to strain hardening after salt weathering, with significant degradation in peak strength and reduced cohesion. As sodium sulfate content increased, salt weathering intensified the effects of "salt crystallization-induced expansion" and "soil drying-induced coagulation" in loess. This process generated numerous expansion cracks and pores both on the surface and within the loess, ultimately causing severe structural and strength deterioration.

Key words: loess; sodium sulfate; salt weathering; shear strength; damage